

GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS MEDIANTE MODULADORES ESPACIALES DE LUZ

Trabajo de grado

Santiago Echeverri Chacón

Director: René Restrepo Gomez

Co-director: Luciano A Ángel Toro

Universidad EAFIT

8 de junio de 2015

Contenido

- 1 Introducción
 - Planteamiento del Problema
 - Contexto
 - Objetivos
 - Justificación
- 2 Generación de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco Teórico
 - Caracterización de un SLM de transmisión
 - Resultados experimentales
- 3 Caracterización de aberraciones de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco teórico
 - Aberraciones simuladas
 - Aberraciones experimentales
- 4 Conclusiones y trabajo futuro
- 5 Bibliografía

Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del Problema
- Contexto
- Objetivos
- Justificación

2 Generación de Vórtices Ópticos

- Introducción
- Marco Teórico
- Caracterización de un SLM de transmisión
- Resultados experimentales

3 Caracterización de aberraciones de Vórtices Ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

Planteamiento del problema

Lograr la manipulación del momento angular de la luz abre campo a una gran cantidad de aplicaciones en numerosas áreas de la ciencia.

Aplicaciones de haces con VOs

NATURE PHOTONICS | ARTICLE

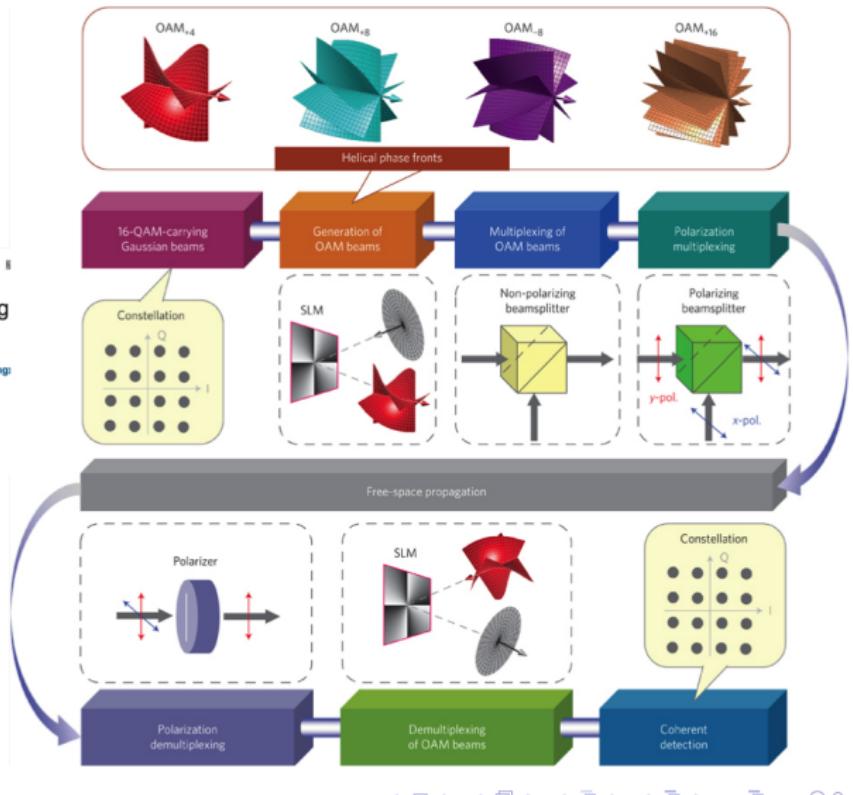
Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing

Jian Wang, Jeng-Yuan Yang, Irfan M. Fazal, Nisar Ahmed, Yan Yan, Hao Huang, Yong Ren, Yang Yue, Samuel Dolinar, Moshe Tur & Alan E. Willner

Affiliations | Contributions | Corresponding authors

Nature Photonics 6, 488–496 (2012) | doi:10.1038/nphoton.2012.138

Received 26 January 2012 | Accepted 14 May 2012 | Published online 24 June 2012



Aplicaciones de haces con VOs

Shadow Effects in Spiral Phase Contrast Microscopy

Alexander Jesacher, Severin Fürhapter, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte

Division of Biomedical Physics, Medical University of Innsbruck, Müllerstr. 44, A-6020 Innsbruck, Austria
(Received 17 December 2004; revised manuscript received 15 March 2005; published 15 June 2005)

Recently it has been demonstrated that spatial filtering of images in microscopy with a spiral phase element in a Fourier plane of the optical path results in a strong edge enhancement of object structures. In principle the operation is isotropic, i.e., all phase edges of a sample object are highlighted simultaneously, independent of their local direction. However, here we demonstrate that the symmetry can be broken intentionally by controlling the phase of the central area of a spiral phase hologram, which is displayed at a computer controlled spatial light modulator. This produces an apparent shadow effect which can be rotated at video rate. The resulting relieflike impression of the sample topography with a longitudinal resolution in the subwavelength regime is demonstrated by imaging a standard low contrast test sample consisting of a human cheek cell.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.233902

PACS numbers: 42.30.Kq, 42.30.Va, 42.40.Eq

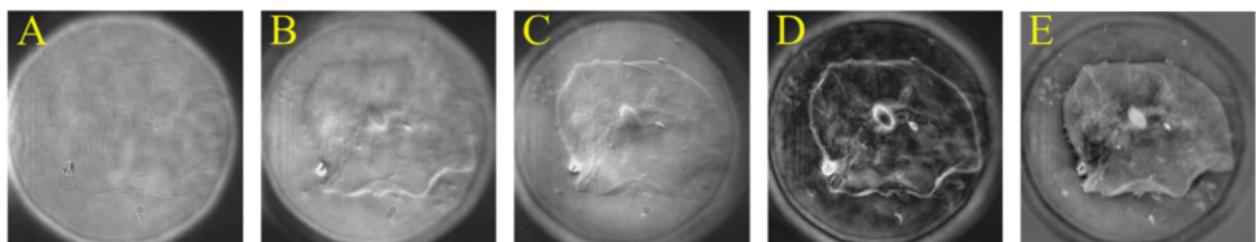
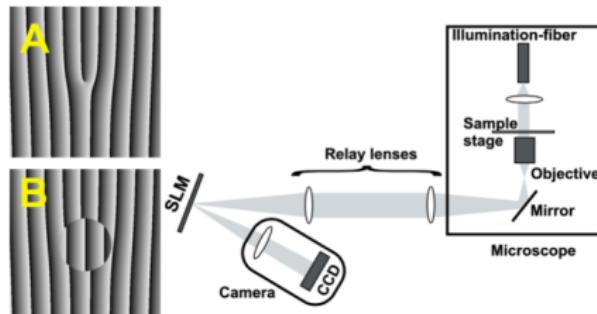


FIG. 3 (color online). Imaging of a human cheek cell. The image diameter is $\sim 50 \mu\text{m}$. (a) Bright-field image. (b) Resulting image after spatial filtering of the original image wave with the symmetry-breaking spiral phase hologram shown in Fig. 2(b). (c) Same spiral-filtering method as in (b), however, the phase of the central blazed grating is offset by π . (d) Absolute value of the complex image composed of 12 shadow effect images recorded with a phase offset of $2\pi/12$ from exposure to exposure. (e) Two-dimensional Hilbert back transform applied to image (d), looking similar as phase contrast microscopy, however with enhanced resolution.

Aplicaciones de haces con VOs

Spiral interferometry

Severin Fürhapter, Alexander Jesacher, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte

Division of Biomedical Physics, Innsbruck Medical University, Müllerstrasse 44, A-6020 Innsbruck, Austria

Received March 14, 2005

We present a surprising modification of optical interferometry. A so-called spiral phase element in the beam path of a standard microscope results in an interferogram of phase samples, for which the interference fringes have the shape of spirals instead of closed contour lines as in traditional interferograms. This configuration overrides the basic problem of interferometry, i.e., that elevations and depressions cannot be distinguished. Therefore a complete sample profile can be reconstructed from a single exposure, promising, e.g., high-speed metrology with a single laser pulse. The method is easy to implement, it does not require a spatially separated reference beam, and it is optimally stable against environmental noise. © 2005 Optical Society of America

OCIS codes: 070.6110, 090.1970, 100.5090.

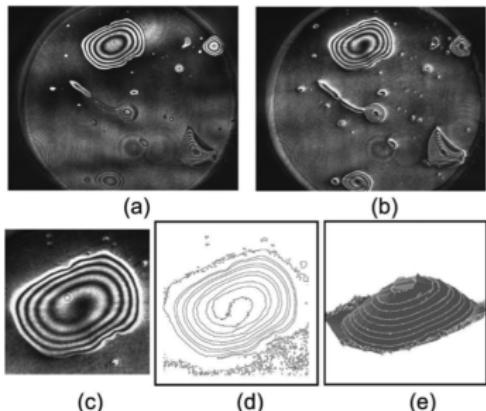
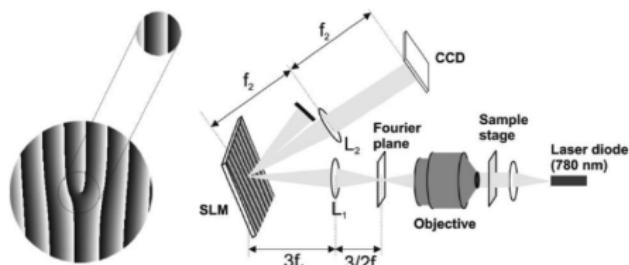


Fig. 3. Experimentally obtained interferogram of an oil drop smeared on a glass coverslip. (a) Normal contourlike interference fringes. (b) Spiral interferogram of the same sample region obtained after filtering with the modified spiral phase hologram (the blazed grating in a small central area; upper left in Fig. 2). (c) Section of the spiral interferogram to be processed. (d) Single contour line of the spiral interferogram. (e) Surface profile reconstructed by processing the contour line and fitting the surface at the obtained sampling points.

Contexto

Proyecto interinstitucional en curso

Aberraciones ópticas en haces Laguerre-Gaussianos: corrección y aplicaciones metrológicas; 2013 – 2015



Contexto



PROSPERIDAD
PARA TODOS

CONVOCATORIA 645 DE 2014. JÓVENES INVESTIGADORES E INNOVADORES

Banco de Financiables

El Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS, presenta a continuación el banco de financiables, conformado por 1.007 becas-pasantías para formación de jóvenes investigadores, según la siguiente relación:

- 367 GRUPOS A1 CON ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE UN JOVEN INVESTIGADOR
- 636 JOVENES ASIGNADOS A ENTIDADES Y GRUPOS DE INVESTIGACIÓN, SEGÚN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN POSTULADO A LA CONVOCATORIA
- 4 JÓVENES INVESTIGADORES CONVENIO OTTO DE GREIFF

367 GRUPOS A1 CON ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE UN JOVEN INVESTIGADOR

Nombre Institución	Nombre Grupo	Proyecto avalado
UNIVERSIDAD DEL VALLE - UNIVALLE	ECCA	el agua tratada del río Cauca.
UNIVERSIDAD DEL VALLE - UNIVALLE	ESTUDIO Y CONTROL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL - ECCA	Optimización del proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos de origen municipal en plantas de manejo de residuos sólidos.
UNIVERSIDAD DEL VALLE - UNIVALLE	GRUPO DE SANEAMIENTO AMBIENTAL	Desafío - Democratización de la gobernabilidad de los servicios de agua y saneamiento mediante innovaciones socio-técnicas
UNIVERSIDAD EAFIT	GRUPO DE OPTICA APLICADA	Aberraciones ópticas en haces Laguerre-GAUSSIANOS: corrección y aplicaciones metrológicas.

Contexto



**|CONVENIO ESPECÍFICO DE COLABORACIÓN ENTRE EL INSTITUTO
NACIONAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL "ESTEBAN TERRADAS" (ESPAÑA) Y
LA UNIVERSIDAD EAFIT (COLOMBIA)
PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO "CARACTERIZACIÓN DE
ABERRACIONES EN OBJETOS DE FASE PARA EL AIV DE INSTRUMENTOS
ÓPTICOS"**

Objetivos planteados en el anteproyecto

Objetivo General

Desarrollar la capacidad para generar y caracterizar vórtices de fase mediante un SLM de transmisión.

Objetivos Específicos

- ① Identificar y apropiar los conceptos y procedimientos necesarios para caracterizar moduladores espaciales de luz de transmisión, con miras a la producción y análisis de vórtices ópticos.
- ② Implementar una plataforma experimental para caracterizar la modulación de amplitud y fase de un SLM a partir de un montaje interferométrico automatizado.
- ③ Obtener experimentalmente vórtices ópticos del tipo Laguerre-Gauss mediante el uso de un SLM y estudiar las distribuciones de intensidad y fase alrededor de los vórtices.
- ④ Proponer alternativas para el desarrollo de aplicaciones metrológicas basadas en la generación de VOs y el estudio de sus propiedades.

Justificación

Contenido

- 1 Introducción
 - Planteamiento del Problema
 - Contexto
 - Objetivos
 - Justificación
- 2 Generación de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco Teórico
 - Caracterización de un SLM de transmisión
 - Resultados experimentales
- 3 Caracterización de aberraciones de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco teórico
 - Aberraciones simuladas
 - Aberraciones experimentales
- 4 Conclusiones y trabajo futuro
- 5 Bibliografía

Contenido

- 1 Introducción
 - Planteamiento del Problema
 - Contexto
 - Objetivos
 - Justificación
- 2 Generación de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco Teórico
 - Caracterización de un SLM de transmisión
 - Resultados experimentales
- 3 Caracterización de aberraciones de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco teórico
 - Aberraciones simuladas
 - Aberraciones experimentales
- 4 Conclusiones y trabajo futuro
- 5 Bibliografía

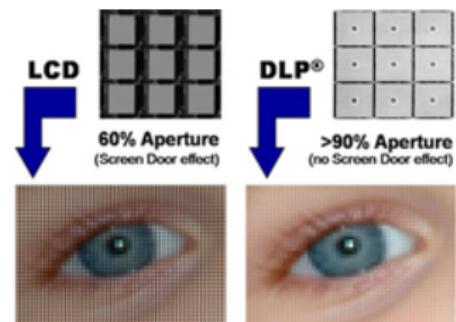
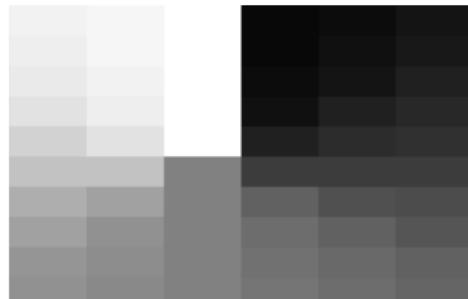
Fuentes de aberraciones

Pueden deberse a imperfecciones en:

- el diseño,
- los materiales,
- la manufactura,
- o la alineación

de elementos ópticos.

Y en nuestro caso, a los efectos no deseados que introducen algunas características del SLM como las distintas formas de discretización y el factor de llenado.



¿Cómo caracterizar las aberraciones?

Métodos interferométricos

Se extrae la fase de patrones de interferencia, se desenvuelve y luego se descompone en alguna base.

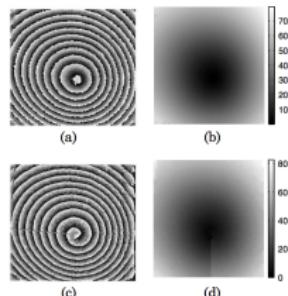
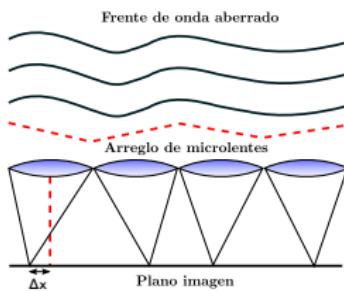


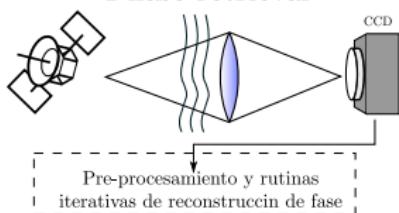
Fig. 4. (a) Traditional ESPI phase modulo 2π using four phase shifts. (b) Traditional ESPI phase unwrap. (c) Spiral ESPI phase modulo 2π using vortex operator. (d) Spiral ESPI phase unwrap.

Métodos no interferométricos

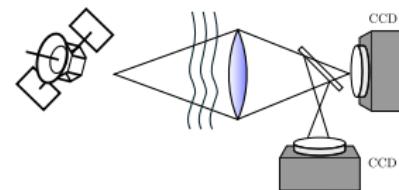
Sensores Shack-Hartmann



Phase retrieval

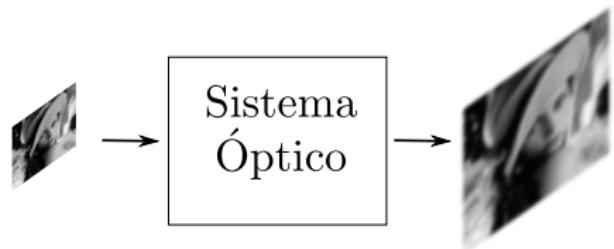


Phase Diversity (PD)



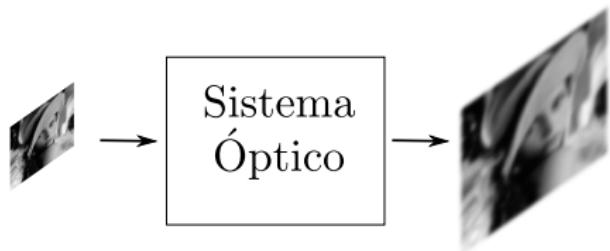
Marco teórico: Sistemas formadores de imagen

Las técnicas de phase retrieval analizan el efecto de las aberraciones sobre las imágenes que produce un sistema óptico. Las aberraciones son caracterizadas cuando se encuentra una función de transferencia que reproduce las imágenes registradas.



Marco teórico: Sistemas formadores de imagen

Las técnicas de phase retrieval analizan el efecto de las aberraciones sobre las imágenes que produce un sistema óptico. Las aberraciones son caracterizadas cuando se encuentra una función de transferencia que reproduce las imágenes registradas.



Transformaciones de imágenes

$$d(\vec{x}) = d_{obj}(\vec{x}) \otimes s(\vec{x}).$$

$$D(\vec{u}) = D_{obj}(\vec{u})S(\vec{u}).$$

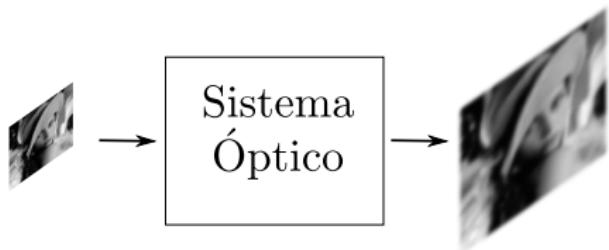
Transformaciones de campos

$$u(\vec{x}) = u_{obj}(\vec{x}) \otimes h(\vec{x}),$$

$$U(\vec{u}) = U_{obj}(\vec{u})H(\vec{u}).$$

Marco teórico: Sistemas formadores de imagen

Las técnicas de phase retrieval analizan el efecto de las aberraciones sobre las imágenes que produce un sistema óptico. Las aberraciones son caracterizadas cuando se encuentra una función de transferencia que reproduce las imágenes registradas.



Transformaciones de imágenes

$$d(\vec{x}) = d_{obj}(\vec{x}) \otimes s(\vec{x}).$$

$$D(\vec{u}) = D_{obj}(\vec{u})S(\vec{u}).$$

Transformaciones de campos

$$u(\vec{x}) = u_{obj}(\vec{x}) \otimes h(\vec{x}),$$

$$U(\vec{u}) = U_{obj}(\vec{u})H(\vec{u}).$$

■ Funciones respuesta al impulso ópticas

Función de dispersión de punto (PSF)

$$s(\vec{x})$$

Función de transferencia óptica (OTF)

$$S(\vec{u})$$

PSF de amplitud (APSF)

$$h(\vec{x})$$

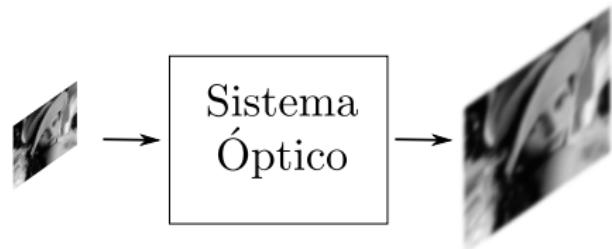
Pupila Generalizada (GP)

$$H(\vec{u})$$

■ Funciones de transferencia ópticas

Marco teórico: Sistemas formadores de imagen

Las técnicas de phase retrieval analizan el efecto de las aberraciones sobre las imágenes que produce un sistema óptico. Las aberraciones son caracterizadas cuando se encuentra una función de transferencia que reproduce las imágenes registradas.



Transformaciones de imágenes

$$d(\vec{x}) = d_{obj}(\vec{x}) \otimes s(\vec{x}).$$

$$D(\vec{u}) = D_{obj}(\vec{u})S(\vec{u}).$$

Transformaciones de campos

$$u(\vec{x}) = u_{obj}(\vec{x}) \otimes h(\vec{x}),$$

$$U(\vec{u}) = U_{obj}(\vec{u})H(\vec{u}).$$

Funciones respuesta al impulso ópticas

Función de dispersión de punto (PSF)

$$s(\vec{x})$$

Función de transferencia óptica (OTF)

$$S(\vec{u})$$

Relaciones importantes

$$S(\vec{u}) = \mathcal{F}\{s(\vec{x})\},$$

$$D(\vec{u}) = \mathcal{F}\{d(\vec{x})\},$$

$$U(\vec{u}) = \mathcal{F}\{u(\vec{x})\} = A(\vec{u})e^{i\phi(\vec{u})},$$

PSF de amplitud (APSF)

$$s(\vec{x}) = |h(\vec{x})|^2,$$

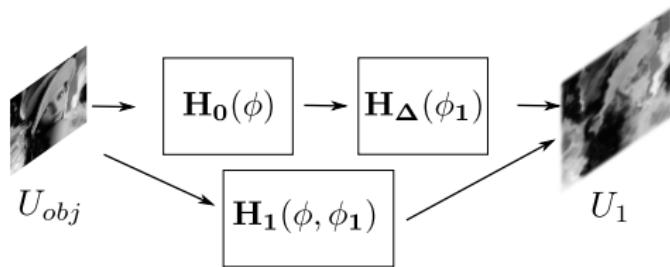
Pupila Generalizada (GP)

H(\vec{u})

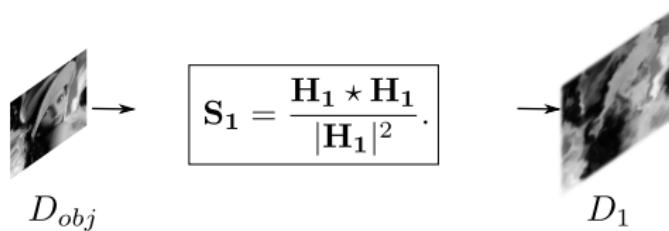
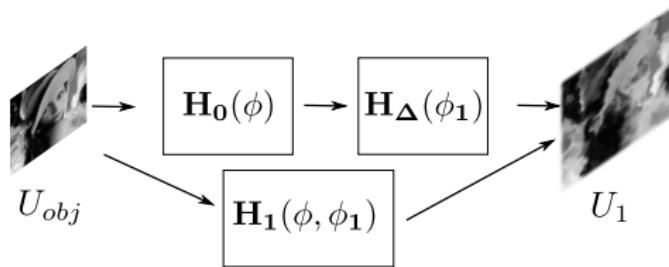
$$S(\vec{u}) = \frac{H(\vec{u}) \star H(\vec{u})}{|H(\vec{u})|^2}.$$

Funciones de transferencia ópticas

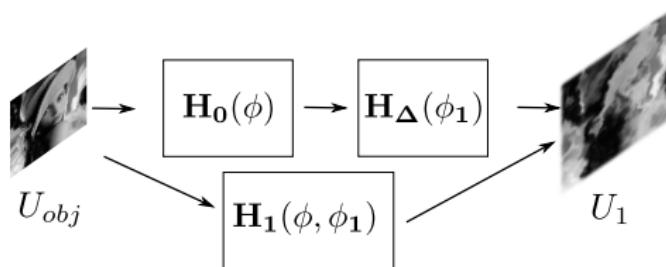
Marco teórico: Phase Diversity



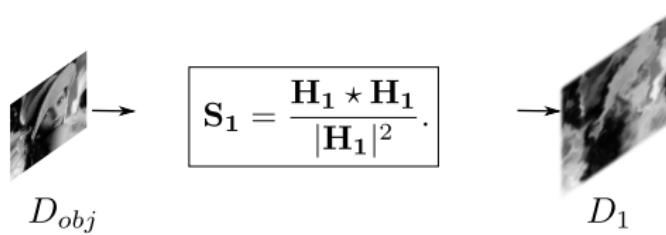
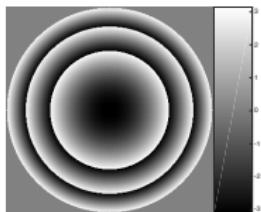
Marco teórico: Phase Diversity



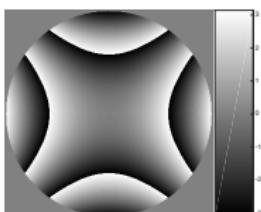
Marco teórico: Phase Diversity



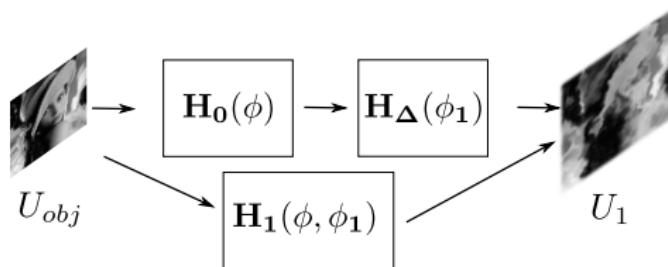
Tradicionalmente se han usado
desenfoques como diversidad



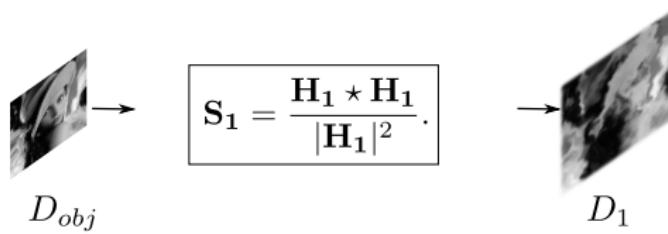
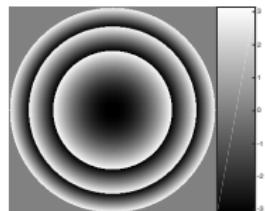
Los dispositivos de fase programable
permiten incluir cualquier tipo de
diversidades, como por ejemplo,
astigmatismo.



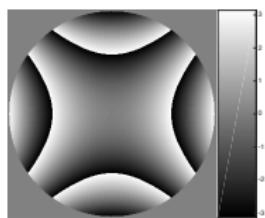
Marco teórico: Phase Diversity



Tradicionalmente se han usado
desenfoques como diversidad



Los dispositivos de fase programable
permiten incluir cualquier tipo de
diversidades, como por ejemplo,
astigmatismo.

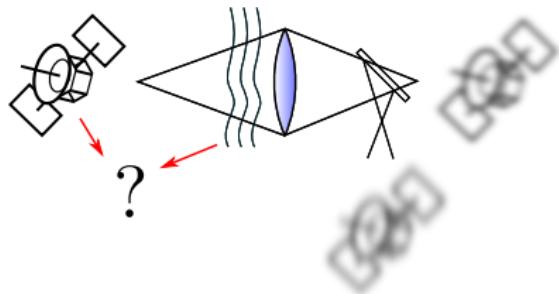


Funcional de minimización

$$L(\bar{D}_{obj}, \phi) = \sum_{j=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} |D_j - \bar{D}_{obj} S_j|^2.$$

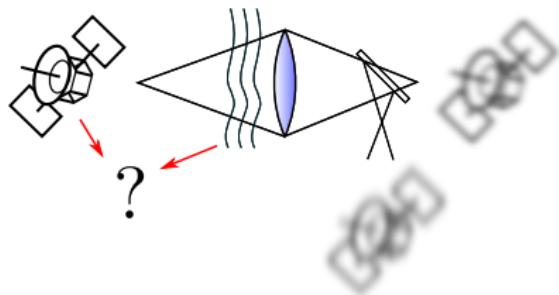
Marco teórico: Phase Diversity con iluminación coherente

En aplicaciones clásicas de PD
el objeto es una de las incógnitas



Marco teórico: Phase Diversity con iluminación coherente

En aplicaciones clásicas de PD
el objeto es una de las incógnitas



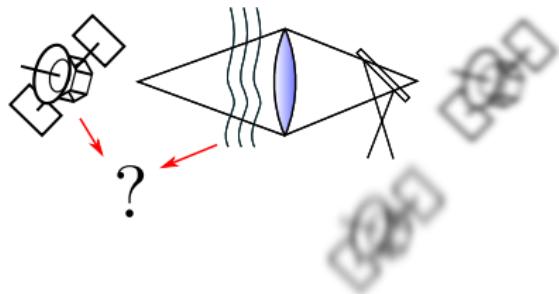
En el laboratorio podemos escoger el tipo de iluminación y definir nuestro propio u_{obj}

$$u_{obj} = e^{\frac{-(x^2+y^2)}{\sigma}}$$

$$u_j(\vec{x}) = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}H_0(\vec{u})H_j(\vec{u})\}$$

Marco teórico: Phase Diversity con iluminación coherente

En aplicaciones clásicas de PD
el objeto es una de las incógnitas



En el laboratorio podemos escoger el tipo de iluminación y definir nuestro propio u_{obj}

$$u_{obj} = e^{\frac{-(x^2+y^2)}{\sigma}}$$

$$u_j(\vec{x}) = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}H_0(\vec{u})H_j(\vec{u})\}$$

Un nuevo funcional de minimización

$$L_j(\phi) = \sum_{j=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} |d_j - |u_j|^2|^2$$

Una nueva familia de diversidades

$$\psi_l = \arg(\exp(i l \theta)),$$

$$u_j^l = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj} A e^{i(\phi + \psi_l + \phi_j)}\}.$$

Una nueva familia de diversidades

$$\begin{aligned}\psi_l &= \arg(\exp(il\theta)), \\ u_j^l &= \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}Ae^{i(\phi+\psi_l+\phi_j)}\}.\end{aligned}$$

Funcional extendido

$$L(\phi) = \sum_{l=0}^L \sum_{j=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} \left| d_j^l - |u_j^l|^2 \right|^2. \quad (1)$$

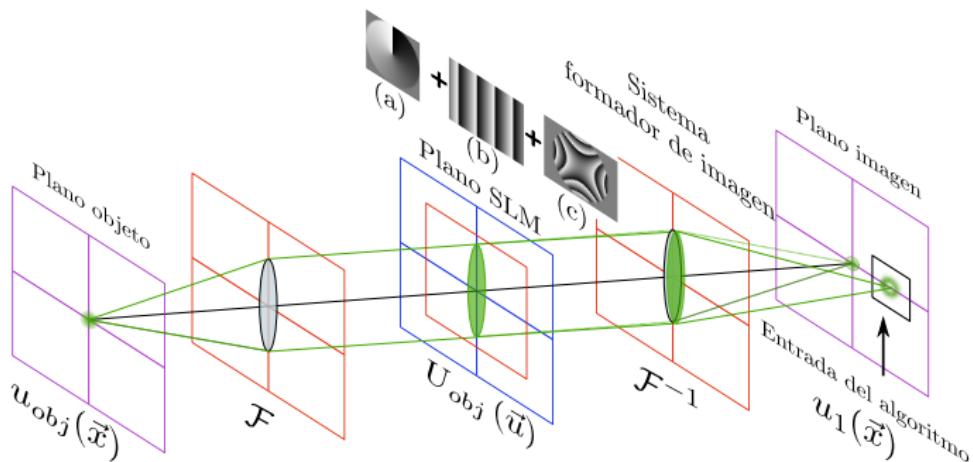
Marco teórico: Phase Diversity con iluminación coherente mejorado con VOs

Una nueva familia de diversidades

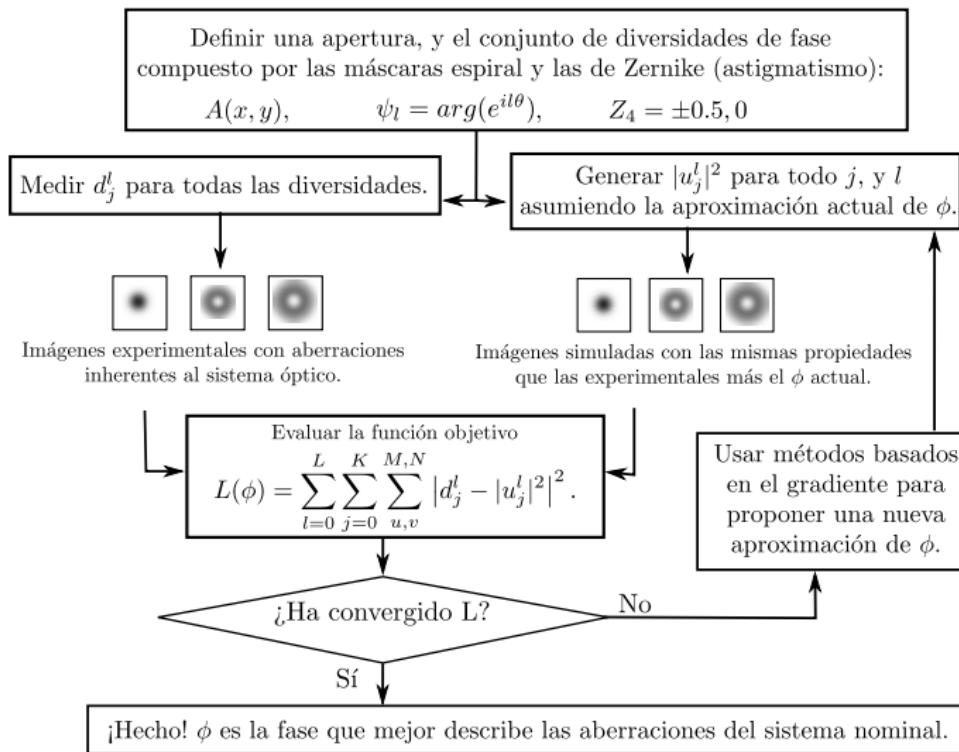
$$u_j^l = \mathcal{F}^{-1}\{U_{obj}Ae^{i(\phi+\psi_l+\phi_j)}\}.$$

Funcional extendido

$$L(\phi) = \sum_{l=0}^L \sum_{i=0}^K \sum_{u,v}^{M,N} \left| d_j^l - |u_j^l|^2 \right|^2. \quad (1)$$



Marco teórico: Algoritmo de la implementación

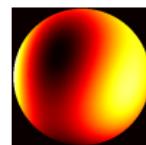


Detección de aberraciones simuladas: Metodología

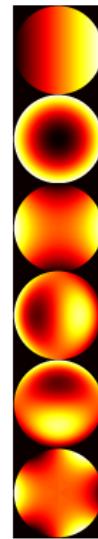
Preparación de fases de referencia

$$\phi(\vec{u}) = \sum_{i=1}^{N=15} a_i Z_i(\vec{u}).$$


Función Aberración



$$= \sum$$



Z_2 : Inclinación en y
 $a_2 = 0,4$

Z_4 : Desenfoque
 $a_4 = 0,2$

Z_5 : Astigmatismo en y
 $a_5 = 0,4$

Z_7 : Coma en y
 $a_7 = -0,5$

Z_8 : Coma en x
 $a_8 = 0,3$

Z_{10} Trefoil en x
 $a_{10} = -0,2$

Métrica de la magnitud de las aberraciones

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{N=15} a_i^2}.$$

Detección de aberraciones simuladas: Metodología

Preparación de fases de referencia

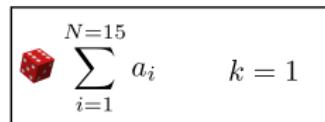
$$\phi(\vec{u}) = \sum_{i=1}^{N=15} a_i Z_i(\vec{u}).$$



Métrica de la magnitud de las aberraciones

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{N=15} a_i^2}.$$

Generación de pesos aleatorios



Medida del RMS

$$\sigma = k \sqrt{\sum_{i=1}^{N=15} a_i^2}.$$

Modificar k siguiendo un esquema de búsqueda del gradiente.

¿ $|\sigma_j - \sigma| <= \epsilon?$

Si
Se usa el conjunto de pesos escalados para simular la detección de aberraciones con magnitud σ_j

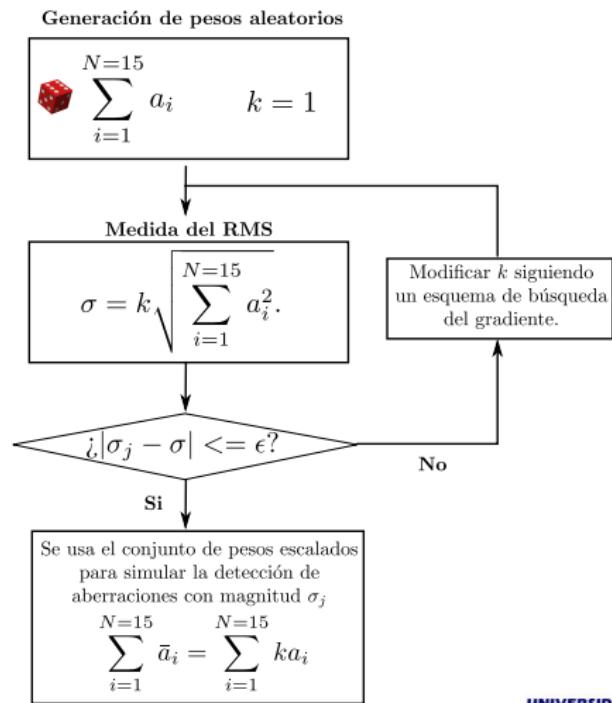
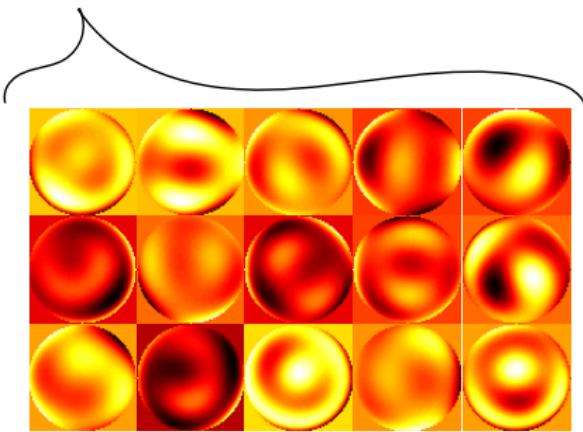
$$\sum_{i=1}^{N=15} \bar{a}_i = \sum_{i=1}^{N=15} k a_i$$

No

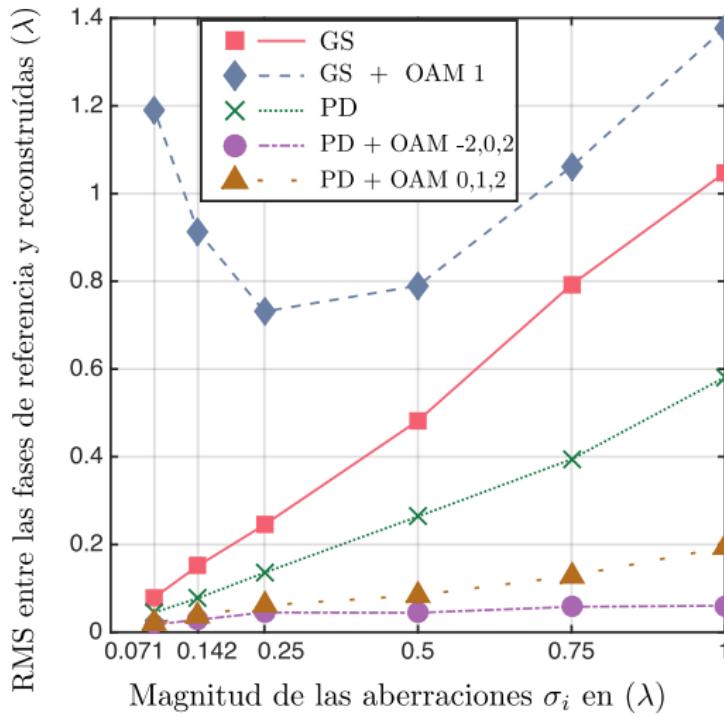
Detección de aberraciones simuladas: Metodología

Para cada magnitud se creó un conjunto de 15 réplicas aleatorias

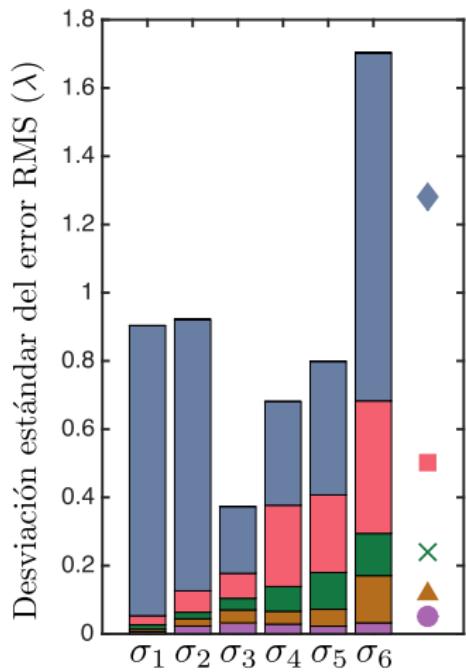
$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$$



Detección de aberraciones simuladas: Resultados

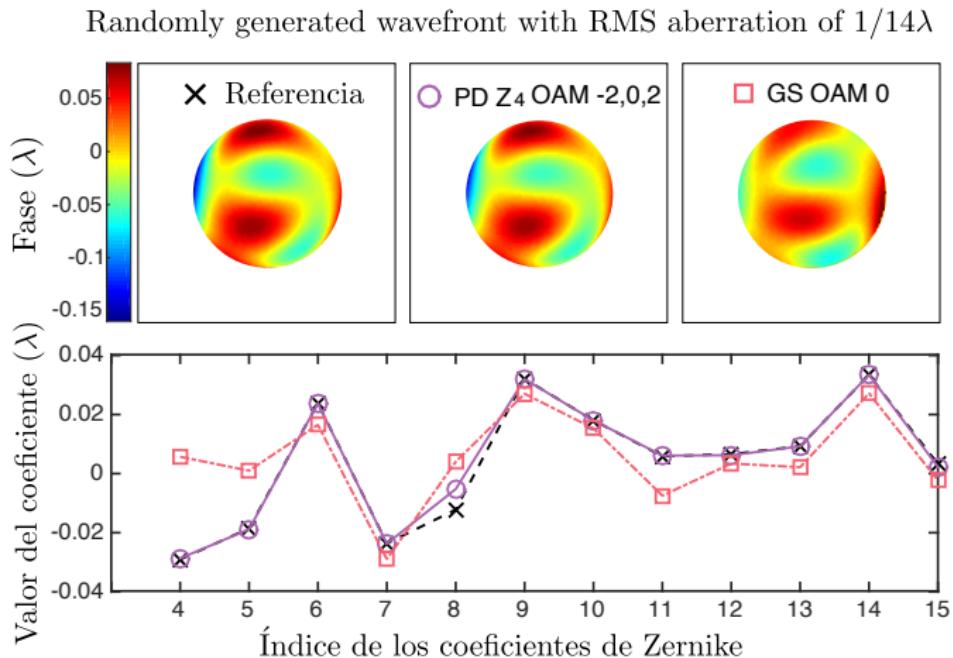


(a)



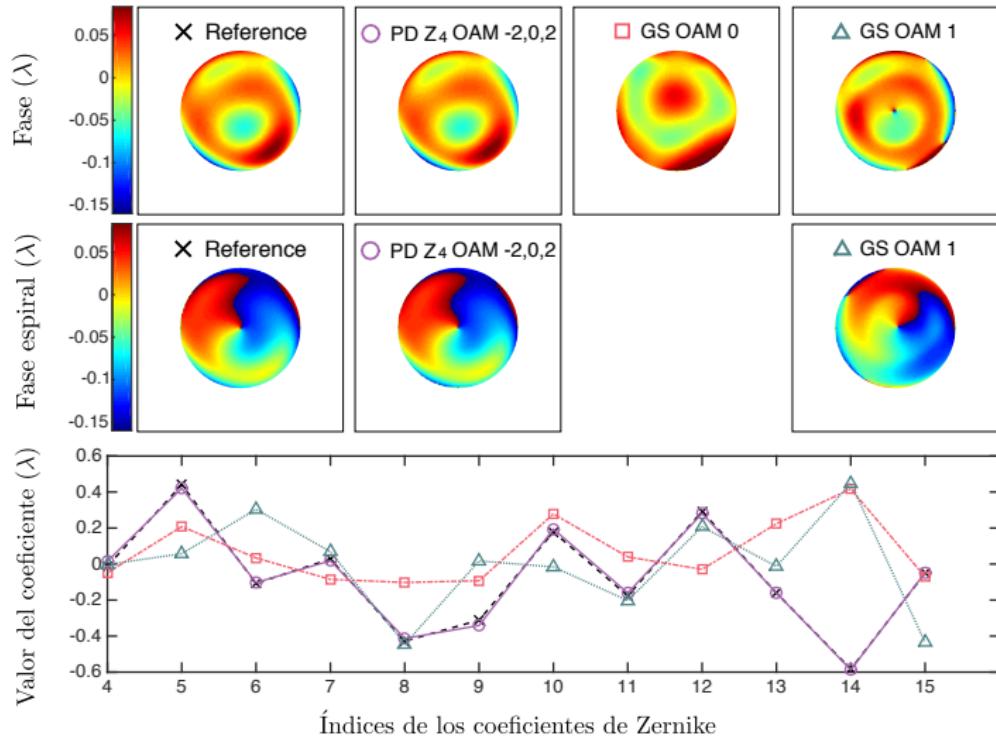
(b)

Detección de aberraciones simuladas: Resultados



Detección de aberraciones simuladas: Resultados

Frente de onda aberrado con RMS de $1/14\lambda$ generados aleatoriamente.



Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del Problema
- Contexto
- Objetivos
- Justificación

2 Generación de Vórtices Ópticos

- Introducción
- Marco Teórico
- Caracterización de un SLM de transmisión
- Resultados experimentales

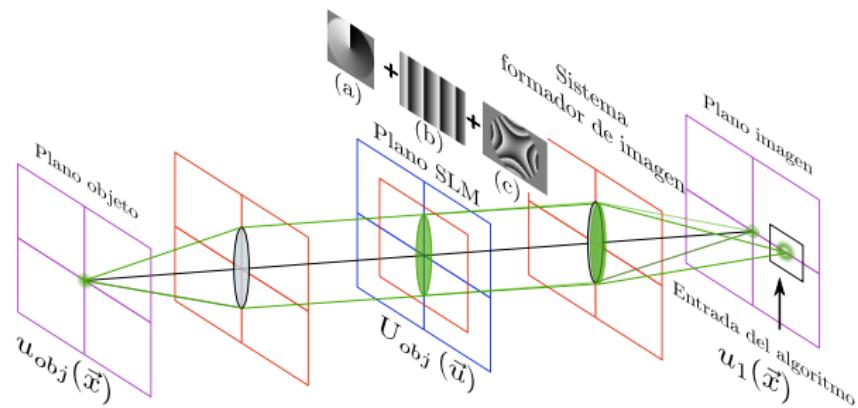
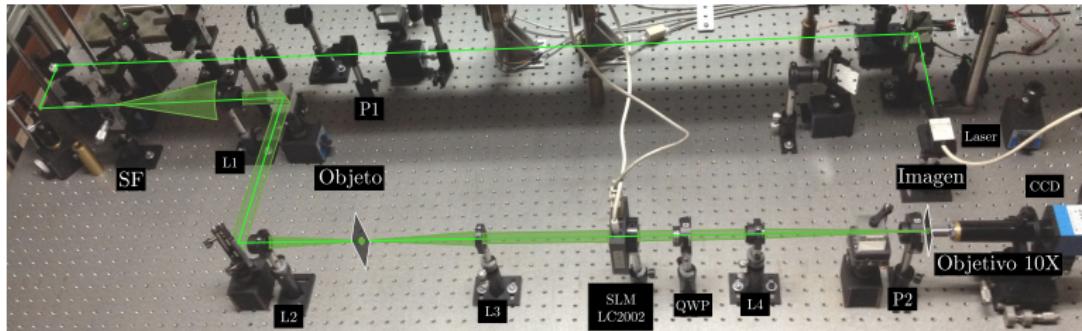
3 Caracterización de aberraciones de Vórtices Ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales

4 Conclusiones y trabajo futuro

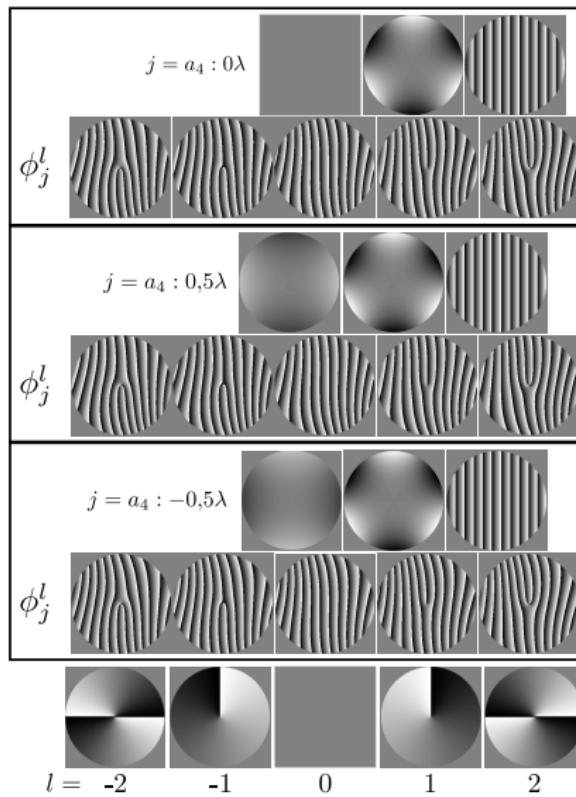
5 Bibliografía

Detección de aberraciones experimentales: Metodología



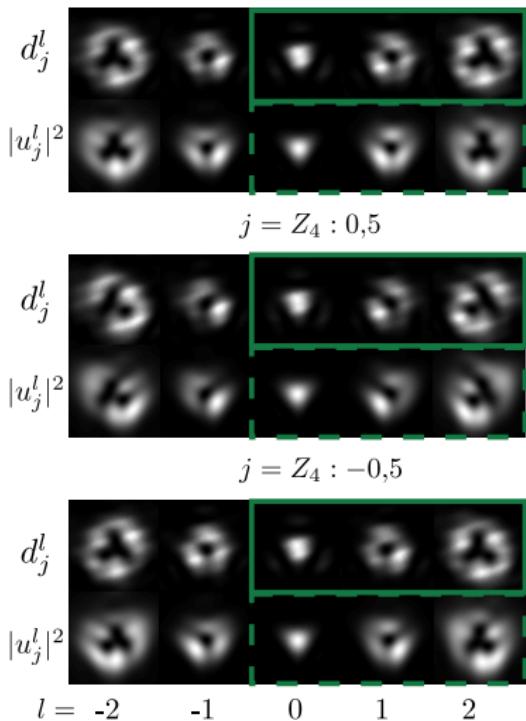
Detección de aberraciones experimentales: Metodología

$$Z_{10} : a_{10} = 1\lambda$$

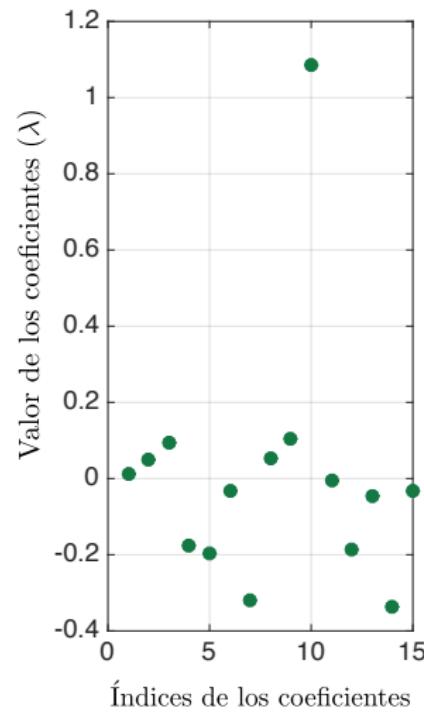


Detección de aberraciones experimentales: Resultados

$$j = Z_4 : 0$$



(a)



(b)

Detección de aberraciones experimentales: Resultados



Contenido

1 Introducción

- Planteamiento del Problema
- Contexto
- Objetivos
- Justificación

2 Generación de Vórtices Ópticos

- Introducción
- Marco Teórico
- Caracterización de un SLM de transmisión
- Resultados experimentales

3 Caracterización de aberraciones de Vórtices Ópticos

- Introducción
- Marco teórico
- Aberraciones simuladas
- Aberraciones experimentales

4 Conclusiones y trabajo futuro

5 Bibliografía

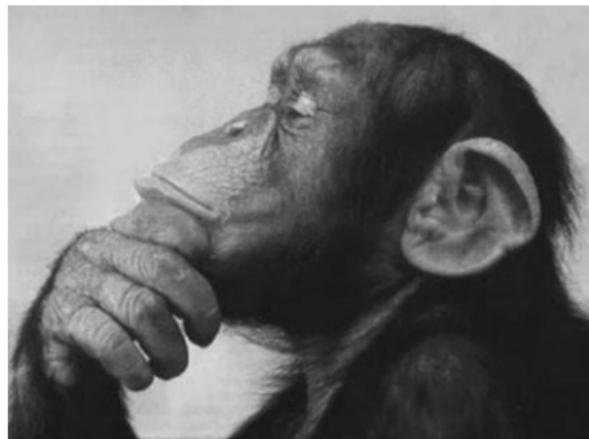
Conclusiones

- Se mostró el resultado de una labor investigativa con la cual fue posible establecer un marco conceptual y teórico para la caracterización y puesta a punto de un modulador espacial de luz de trasmisión basado en cristales líquidos del tipo twisted nematic.
- Se presentó un sistema automatizado para la caracterización de pantallas de cristál líquido que se compone de una parte física, que involucra cuatro rotadores ópticos mecatrónicos, y una parte de software que adquiere los datos y los procesa para obtener las matrices de Jones que describen el elemento birrefringente para cada nivel de gris.
- Asimismo, se desarrolló y puso en proceso de registro una aplicación de software en la plataforma Matlab® para la generación de máscaras de fase arbitrarias a ser proyectadas en el SLM. Esta aplicación permite:
 - Crear máscaras de fase espiral de carga entera arbitraria sumadas a:
 - Lentes.
 - Rejillas de difracción de varios tipos.
 - Aberraciones ópticas compuestas a partir de polinomios de Zernike.
 - Discretizar las máscaras de fase en la cantidad de niveles deseados

Trabajo futuro

¿Qué vale la pena explorar en trabajos futuros?

¿Preguntas?



Contenido

- 1 Introducción
 - Planteamiento del Problema
 - Contexto
 - Objetivos
 - Justificación
- 2 Generación de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco Teórico
 - Caracterización de un SLM de transmisión
 - Resultados experimentales
- 3 Caracterización de aberraciones de Vórtices Ópticos
 - Introducción
 - Marco teórico
 - Aberraciones simuladas
 - Aberraciones experimentales
- 4 Conclusiones y trabajo futuro
- 5 Bibliografía

Bibliografía I